

УДК 669.715

**АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ РАСТЯЖНО-ОБТЯЖНОМ ПРЕССЕ**

© 2024 В.А. Михеев, Д.В. Гусев, М.М. Баранова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 23.05.2024

В статье анализируется кинематика формообразования алюминиевых листов методом имитационного моделирования, которые, изначально плоские, деформируются в пространстве, принимая поверхности сегментов оболочки полусферы. Такие поверхности рассматриваются как геометрические формы независимого пространства, то есть, соответствующие этим пространствам двумерные геометрии могут быть весьма удачными при их построении, рассматривая поверхности как пространство само по себе. Поэтому переход от трехмерной геометрии к двумерной геометрии оказался более удобным для определения траекторий каждой точки на начальной плоской поверхности в соответствующую окончательную позицию в требуемой оболочке, что отражается в пространстве при формообразовании полусферических оболочек. Такая траектория точки и окончательная ее позиция вместе с траекториями и окончательными позициями других точек в требуемой оболочке составляют формообразующую деформацию, что может обеспечить получение оболочки с равномерной толщиной по всем геодезическим образующим поверхности оболочки заданной геометрической формы в конце процесса формообразования. В статье описаны результаты формообразования при моделировании сегментов – частей полусферы из алюминиевых листов сплава АМг6 толщиной 4,5 мм на специализированном растяжно-обтяжном прессе.

Ключевые слова: обтяжка, формообразование, растяжно-обтяжной пресс, числовое моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-67-76

EDN: CSUODC

ВВЕДЕНИЕ

Два пересекающихся семейства линий на рассматриваемых поверхностях образуют сеть кривых линий. Среди множества различных сетей кривых линий имеются некоторые, которые обладают важными свойствами. К их числу относятся сети: сопряженных линий, ортогональных линий, линий кривизн, притом главных, асимптотических линий, геодезических линий. Все эти сети связаны с определенными свойствами поверхности [1,2]. Выбор этой сети зависит от задач, которые поставлены исследователями. Нами предлагается сделать шаг в технологическом направлении, что включает различия в свойствах поверхности для оболочки полусферы, от которой может зависеть полный контроль над процессом формообразования оболочки с равномерной толщиной по всем геодезическим образующим поверхности оболочки заданной геометрической формы.

Михеев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: vatichееv@rambler.ru

Гусев Дмитрий Вячеславович, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: gushidding97@mail.ru

Баранова Марина Михайловна, аспирант кафедры обработки металлов давлением. E-mail: marinaaaaad@mail.ru

Проблема выбора геометрии, наиболее соответствующей реальному физическому пространству, первоначально была поставлена в работах Гаусса [3,4] и получила продолжение в работах Римана [5]. Метод, разработанный Гауссом, для описания кривых поверхности и обобщенный Риманом для описания искривления поверхности, состоит в том, чтобы описывать кривизну поверхности не как «видимую со стороны», а как оно искривляется во внешнем пространстве. Они рассматривали понятия, что его внутренняя геометрия, т.е. сеть расстояний между точками, которые можно измерять, оставаясь внутри него, не соответствует геометрии евклидова пространства.

Обычно мы изучали геометрию на поверхности сферы, считая последнюю частью трехмерного евклидова пространства. Но предположим, что мы рассматриваем поверхность сферы как пространство само по себе и строим геометрию такого пространства. Прямоугольные координаты здесь не очень подходят, прямые линии просто отсутствуют на поверхности сферы. В качестве координат какой-либо точки на поверхности сферы можно взять, например, широту и долготу. Как подсказывает наш опыт, интерпретированный ведущими математиками, кратчайшим путем на поверхности сферы являются дуги больших кругов, например, ме-

ридианы. Эти дуги и есть «прямые» в сферической геометрии. Поскольку любые два больших круга пересекаются не один раз, а дважды, то в сферической геометрии любые две «прямые» пересекаются дважды, разумеется, они не «параллельны». Поэтому геометрия поверхности сферы будет неевклидовой и она достаточно «удобна в обращении», по крайней мере, ничуть не уступает той, которая рассматривает сферу как двумерную поверхность в трехмерной евклидовой геометрии.

В контексте дифференциальной геометрии линии кривизн являются контурами нормальных сечений поверхности, имеющими геодезическое происхождение согласно метрике Гаусса. Они согласуются с внутренней геометрией поверхности, метрические свойства которой остаются неизменными при ее изгибаниях. В этом заключается большая важность метрических понятий и некоторые свойства поверхности, связанные со структурой дифференциальной квадратичной формы для элемента кривой на поверхности, которые могут быть исследованы независимо от пространства. Такие свойства поверхностей называются внутренними, а геометрия, основанная на изучении дифференциальной квадратичной формы, внутренней геометрией [6].

Тогда, следуя Гауссу, определим поверхность в трехмерном евклидовом пространстве параметрическим образом заданием трех уравнений $x^i = x^i(q^1, q^2)$, где $i = 1, 2, 3$. Параметры q^1, q^2 определяют на поверхности сетку кривых, называемых криволинейными, или, гауссовыми координатами. Затем, следуя локальному поведению пространства, ибо свойства последнего могут изменяться от точки к точке, Риман столкнулся с необходимостью определения расстояния между двумя характерными точками, координаты которых отличаются на бесконечно малые величины [7].

Он предложил, что квадрат этого расстояния в трехмерном пространстве, можно представить в виде: $ds^2 = q^{11}dx_1^2 + q^{22}dx_2^2 + q^{33}dx_3^2$. Из формулы для ds^2 с помощью дифференциальной геометрии можно извлечь множество данных о длинах, площадях, объемах и других характеристиках геометрических фигур, в нашем случае о полусфере. Здесь Риман сосредоточился на свойствах малых областей поверхности, нежели на ее общих геометрических свойствах. Однако, он сумел объяснить, каким образом сферу можно интерпретировать как двумерное эллиптическое пространство. Совершенно ясно, что геометрия поверхности сферы будет неевклидовой, поэтому впоследствии она получила название удвоенной эллиптической геометрии [8].

Постепенно неевклидова геометрия и вытекающее из нее следствие относительно ис-

тинности этой геометрии были признаны, но отнюдь не потому, что ее применимость была подтверждена какими-то новыми данными. Например, в римановой геометрии присутствует локальная мера длины, получаемой путем приравнивания соприкасающихся поверхностей в евклидовом пространстве. В системе координат главных направлений x_0 и y_0 , лежащих в касательной плоскости, поверхность оболочки в окрестности точки O , можно представить в виде функции:

$$z_0 = \frac{1}{2} \cdot (k_1 \cdot x_0^2 + k_2 \cdot y_0^2). \quad (1)$$

Явная форма задания поверхности в таком виде используется для нахождения характерных метрических свойств поверхности оболочки той или иной геометрической формы. Подобно тому, как в бесконечной близости к точке кривой близка некоторая окружность, так и к поверхности оболочки в окрестности точки O , будет близка некоторая классическая квадратичная поверхность второго порядка (эллиптическая, сферическая, гиперболическая, тороидальная). Тем самым, можно присвоить особый статус точке O и геометрию поверхности, расположенную относительно точки O , вполне можно представить в виде специальной структуры сети линий кривизн. Локальные значения кривизн в точке O равны k_1 и k_2 , а внутреннее произведение в виде гауссовой кривизны: $K = k_1 * k_2$.

Оболочку полусферы получают из свариваемого алюминиевого листового материала, и она является элементом конструкций различных космических аппаратов. Под космическим аппаратом (КА) понимают техническое устройство, предназначенное для функционирования в космическом пространстве с целью решения задач в соответствии с назначением космического комплекса или космической системы.

Корпус КА должен быть достаточно прочным и жестким, способным выдержать нагрузки, действующие на него на всех этапах его жизненного цикла. Корпус должен обеспечивать надежную защиту экипажа и расположенного в нем бортового оборудования от воздействия окружающей среды. Форма корпуса должна обеспечивать при движении КА в атмосфере устойчивость, управляемость, заданное аэродинамическое качество. Это обеспечит только устойчивое управление процессами формообразования оболочки полусферы при равномерном изменении толщины в различных областях листовой заготовки. Имеется производственный опыт при получении деталей оболочек сферической формы, представляющих собой сегменты – части полусферы, на растяжно-обтяжном прессе. Для этого применяют свариваемый алюминиевый листовый материал толщиной 4,5 мм из сплава АМгб.

Обтяжка относится к формообразующим операциям, связанным с увеличением площади листовой заготовки за счет толщины листа с последующей локализацией растяжения в опасном сечении детали. В результате листовая заготовка быстро утоняется и разрушается, что и является причиной высокого брака и больших технологических отходов. Причиной локализации растяжения листовой заготовки является, прежде всего, неравномерность деформации из-за влияния сил трения и сложной формы оболочки. Чаще всего локализация растяжения при обтяжке происходит на участке схода листовой заготовки с обтяжного пуансона перед зажимными устройствами обтяжного пресса. При этом утонение листовой заготовки, возникающее при обтяжке, не зависит от самой схемы обтяжки, а зависит от условий трения, толщины, характера анизотропии, деформационных характеристик листового проката и ее термообработки.

Для обеспечения монотонности деформации формообразование листовой заготовки необходимо проводить в условиях формовочной деформации без ее локализации в любой части листовой заготовки, особенно в части заготовки, расположенной между краем обтяжного пуансона и зажимными губками пресса. Для этого необходимо создавать эти условия, которые имеют технологическую направленность и наличие соответствующего оборудования при равномерном изменении толщины в различных областях листовой заготовки.

В нашем случае поставлена цель снизить степень неравномерности деформации листовой заготовки, приводящей к минимизации риска локального утонения листовой заготовки и к уменьшению разнотолщинности полученной сферической детали до прогнозируемых пределов. Необходимо построить модель формовочной деформации, пытаясь получить нужное решение за счет численного эксперимента при подборе желаемой последовательности шаговых движений растяжно-обтяжного пресса РО-3М и точнее спрогнозировать последствия, сокращая число альтернатив и обеспечивая эффективность вычислительного алгоритма.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ФОРМОВОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Переход на методы, которые позволяют определять лишь систему линий, лежащих на поверхности, а не саму поверхность, оказался более удобным при анализе кинематики формообразования оболочек сложных геометрических форм. Тогда в процессе анализа кинематики формообразования оболочек кривые и поверхности определяются с помощью пара-

метрического представления, а не в декартовых координатах.

Параметрическое представление кривых и поверхностей, во-первых, дает возможность получить простое математическое описание кривых в трехмерном пространстве без своих проекций на две взаимно перпендикулярные координатные плоскости; во-вторых, представление кривых в параметрических координатах дает возможность избежать проблемы, когда замкнутые кривые и кривые с вертикальными касательными представляются в определенной системе координат. Другими словами, параметрический способ задания кривых освобождает от привязки к какой-либо определенной системе координат, т.к. форма объекта не зависит от выбора системы координат, поэтому разработку параметрического метода можно считать закономерной.

Формообразование в нашем случае определяется как процесс изменения начальной плоской поверхности заготовки в соответствующую окончательную позицию геометрической формы требуемой оболочки, что отражается в пространстве при формообразовании оболочек. Требуется построение модели формовочной деформации, которая обеспечивает оптимизированную геометрическую интерполяцию между плоской листовой заготовкой и пространственной формой оболочки. Среди методов производства таких оболочек из плоской листовой заготовки остается только формообразование обтяжкой на специализированном обтяжном прессе. Крупногабаритную полусферическую оболочку стараются получать из отдельных элементов-«осьмушек» свариваемого алюминиевого толстостенного листового материала.

До сих пор существует необходимость получения обтяжкой элемента-«осьмушки» полусферической оболочки радиуса $R=5180$ мм при размерах заготовки $4000 \times 2100 \times 4,5$ (мм \times мм \times мм) из свариваемого алюминиевого сплава АМг6М. Для реализации формообразования обтяжкой используется стандартное обтяжное оборудование (пресс РО-3М, имеющий угол поворота зажимных устройств до 40°). Однако он не позволял изготавливать крупногабаритные детали с углами охвата листом обтяжного пуансона α_k близких к 60° , даже несмотря на то, что усилие растяжения на прессе РО-3М воспринимается ходовыми винтами, а не фиксаторами [9]. Для изготовления данной оболочки практически однотипной крупногабаритной детали этот пресс РО-3М превратили в специализированное обтяжное оборудование для реализации комбинированного способа формообразования обтяжкой отдельных элементов-«осьмушек» крупногабаритной полусферической оболочки. Во-первых, для обеспечения продольного

угла охвата листом обтяжного пуансона α_k до 60° и нужных условий для реализации комбинированного способа обтяжки была изменена силовая кинематическая схема работы прессы. Во-вторых, увеличили силовые параметры обтяжного пресса РО-3М в 1,5 раза. Это было осуществлено путем увеличения рабочего давления в гидроприводе (была заменена насосная станция, трубопроводы и гидроаппаратура).

При изменении силовой кинематической схемы работы пресса РО-3М (рисунок 1) плунжерные растяжные цилиндры 1 и зажимные устройства 2 были установлены в горизонтальной плоскости, а заданный угол облегания пуансона 3 заготовкой был получен за счет перегиба листовой заготовки через прямолинейные штанги 4, которые крепятся на кронштейнах к порталу пресса 5. Портал представляет собой сварную жесткую балку, установленную на четырех стойках, закрепленных на станине пресса.

В ходе работы по отработке комбинированного способа формообразования обтяжкой крупногабаритной полусферической оболочки были опробованы технологическая возможность изменения угла охвата и последовательность работы различных силовых органов пресса РО-3М. Верхний стол со своими гидроцилиндрами был убран. Все остальные силовые гидравлические цилиндры пресса (растяжные, нижнего стола) были запитаны от одного индивидуального насосного привода.

Реализация комбинированной обтяжки после изменения силовой кинематической схемы

работы пресса РО-3М предусматривает соответствующую комбинацию элементов обтяжки с растяжением, простой и ступенчатой обтяжки [10]. При этом основной задачей является максимально возможное формообразование центрального шарового участка оболочки, характеризующегося шириной очага деформации в центральном сечении, без избыточного деформирования листовой заготовки в районе зажимных устройств. Потребная деформация при формообразовании центрального шарового участка оболочки составляет 0,25 относительных единиц (25%). Решению этой задачи способствовала серия численных экспериментов, позволившая обосновать оптимальный угол охвата на первой ступени обтяжки. Совместный замер усилия и деформации позволил установить связь между этими параметрами и углом охвата. В частности, было установлено, что угол охвата влияет на соотношения между деформацией в опасном сечении и усилием. При увеличенном угле охвата деформации в центральном сечении затруднены и были далеки от формовочной деформации.

Однако, рассмотрим формовочную деформацию, которая близка к формообразованию цельной полусферической оболочки, которую невозможно изготовить обтяжкой на стандартном обтяжном оборудовании из-за классической осесимметричной геометрической формы и крупных габаритных размеров. Затем промоделируем процесс формообразования обтяжкой элемента-«осьмушки» полусферической обо-

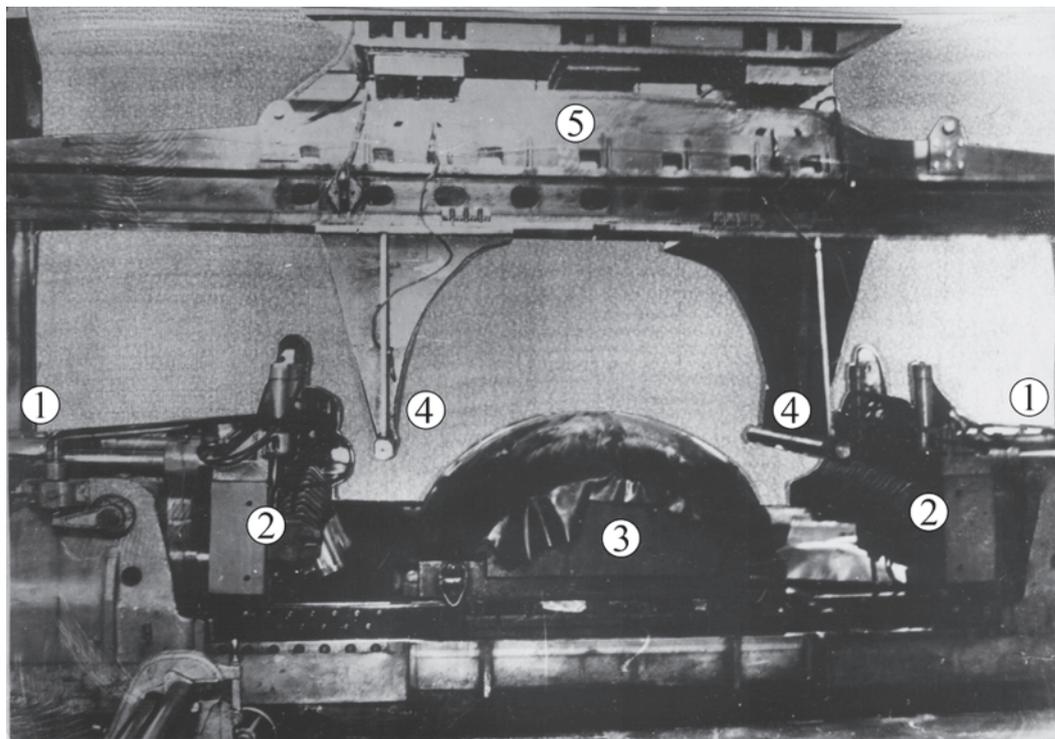


Рисунок 1 – Растяжно-обтяжной пресс РО-3М, приспособленный для формообразования обтяжкой элемента-осьмушки полусферической оболочки радиуса $R=5180$ мм при размерах заготовки $4000 \times 2100 \times 4,5$ (мм \times мм \times мм) из свариваемого алюминиевого сплава АМг6М

лочки, меняя конфигурацию прямолинейных штанг растяжно-обтяжного пресса, и проанализируем получаемую деформацию.

На рисунке 2 показана классическая геометрия цельной полусферической оболочки, имеющей на поверхности кривые, представленные в параметрических координатах: α и β , где O – основная декартова система (оси x , y и z), r_e – внешний радиус полусферы, α – угол между осью z и отрезком OP , β – угол между осями x и x^1 и P – точка на поверхности полусферы.

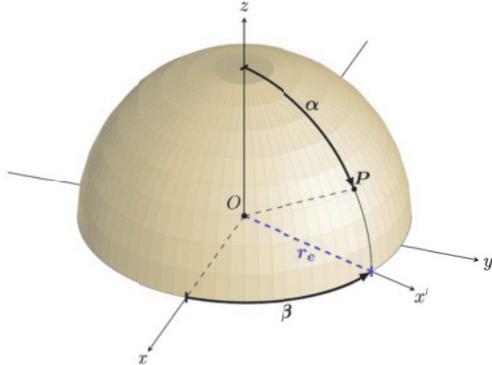


Рисунок 2 – Классическая геометрия цельной полусферы

Имея данные параметры, которые определяют классическую геометрию полусферы, можно отобразить идеальную траекторию каждой точки детали вдоль геодезических кривых. Точка P внутри начального плоского кольца для полусферы (рисунок 3) делит его поверхность на две части окружностью радиуса, равного ее координате x_p . Первая часть поверхности – внутри радиуса x_p (область A_{dp1}), и вторая часть между x_p и внешним радиусом r_e (область A_{dp2}). На рисунке 3 O – основная декартова система (оси x , y и z), разделение площади на плоском диске по координате x_p точки P , r_d – радиус плоского диска, P – точка на поверхности диска; x_p – радиальная координата точки P на ось x , β_p – угол точки P между осями x и x^1 для полусферической оболочки.

Площади этих поверхностей могут быть рассчитаны с определенными параметрами. Такое же деление может быть выполнено, когда плоский диск уже принимает геометрическую форму полусферы.

Из принципа непрерывного расширения известно, что площадь любой части поверхности увеличивается с той же скоростью, что и общая площадь получаемой детали. Позиция P в процессе формообразования определяется на основе этого принципа. Следовательно, можно определить, что отношение между площадью первой части поверхности, ограниченной точкой P в промежуточном сечении полусферы, и соответствующей площадью этой же части поверхности на плоском кольце, равно отношению между общей площадью полусферы и общей площадью плоского кольца A_{ap} .

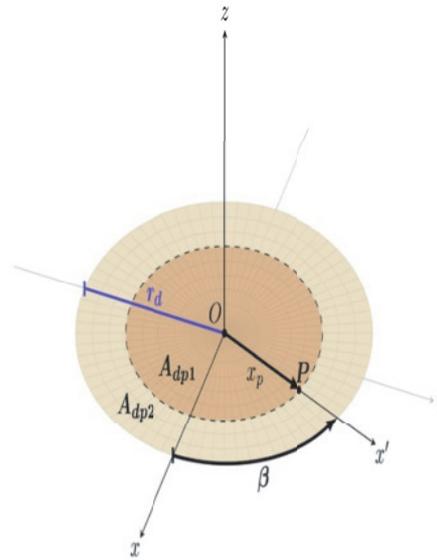


Рисунок 3 – Геометрия плоского диска для полусферы

Теперь мы знаем геометрию двух тел (плоский диск и цельная полусфера), первая преобразовывается во вторую за счет формообразующей деформации. Такое формообразование должно быть таким, чтобы в течение всего процесса, пока не получена желаемая конечная форма детали, каждая из ее точек воспринимала исключительно растягивающие напряжения тангенциально меридиальному направлению в окончательную геометрию детали, конечно за счет измерения ее толщины. При этом соблюдается принцип двумерной геометрии поверхности плоского диска и цельной полусферы, заданные параметрическими линиями кривизн.

Таким образом, описанная геометрия двумерной геометрии поверхности плоского диска и цельной полусферы теперь понимается как преобразование функции-площади между их частями для формообразования обтяжной элемента – части полусферической оболочки.

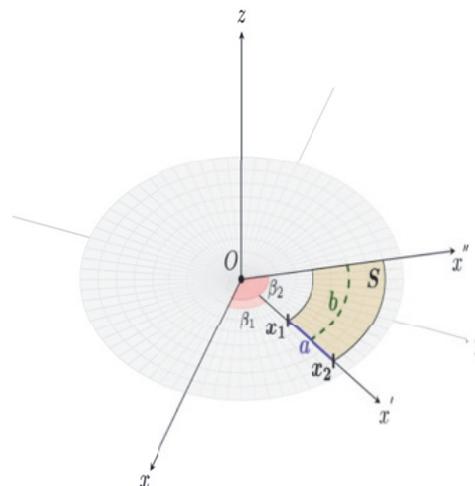


Рисунок 4 – Компонировка функции-площади «осьмушки» плоского диска

Осталось определить функции-площади модели как части полусферической или оболочки, которые определяют идеальные координаты каждой точки детали в процессе непрерывного расширения начальной «осьмушки» плоского диска в геометрию готовой части полусферической оболочки (рисунок 5). С помощью функций-площадей частей каждая точка, отмеченная в начальной части плоского диска, будет иметь свой идеальную траекторию. При моделировании все необходимые данные траектории воспроизводятся в реальной конформации. Тогда эффект формовочной деформации, предусмотренный этим моделированием, будет достигнут с учетом целевого параметра – минимальная разнотолщинность готовой детали.

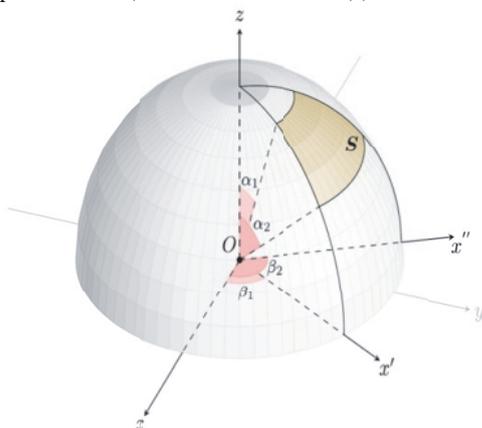


Рисунок 5 – Компоновка функции-площади «осьмушки» полусферической оболочки

Существуют данные, которые геометрически описывают траекторию любой точки поверхности для формообразования обтяжки элемента-части полусферической оболочки. Вычислив α_p , получаем пространственные координаты x_p , y_p и z_p (1) точки P, которые понимаются как преобразование соответствующей функции-площади

$$\begin{aligned} x_p &= (\sin(\alpha_p)r_{cts} + r_t)\cos\beta_p; \\ y_p &= (\sin(\alpha_p)r_{cts} + r_t)\sin\beta_p; \\ z_p &= \cos(\alpha_p)r_{cts}. \end{aligned} \quad (2)$$

При геометрическом определении начальной и конечной фигуры для составления этих данных использовались координаты, углы и другие параметры. Однако не все эти параметры, используемые для описания начальной формы, совпадают с параметрами, используемыми для описания окончательной формы. Например, угол α , который описывает кривую в полусфере, не может быть напрямую интерполирован из заданного начального значения к конечному значению, так как этого угла не существуют в описании плоского кольца. Следовательно, нет прямой интерполяции между параметризациями двух описанных геометрий. Поэтому математическое решение включает в себя анализ

для разработки функции-площадей различных наборов параметров.

В данном случае ключевым моментом для разработки функции-площадей является начало процесса преобразования, потому что хотя параметризация, действующая в момент времени $t = 0$, является параметризацией плоского кольца, как только начинается преобразование, то в первый момент, когда t становится больше нуля, деталь больше не является плоским и сразу принимает геометрическую форму полусферы.

Из функций-позиции точек интерполяции создаются карты формовочной деформации, завершающие получение геометрической формы полусферической оболочки. Они представляют собой последовательный набор карточек, которые дискретно показывают переходы от плоского диска к форме полусферы. На каждой карте, начиная с временной карты $t = 0.0$, отмечается распределение пронумерованных точек на представлении проектируемой геометрии на плоскости xu , этот вид по вертикали. Рядом с точками отмечены числовые значения их горизонтальных и вертикальных смещений. Эти значения представляют собой разницу между текущими x и z координатами точки в момент времени t отображаемой карты и соответствующими координатами той же точки на следующей карте после определенного шага (рисунок 6).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результат моделирования обтяжки сегмента полусферической оболочки с прямолинейными штангами

Ниже приведен результат моделирования варианта формообразования обтяжкой с прямолинейными штангами (рисунок 7): значения деформации в трех характерных точках А, В и С оболочки (рисунок 8), графики изменения в этих же точках деформации и толщины оболочки из листового материала АМг6М (рисунок 9).

Для двух первых вариантов конструкции штанг (прямолинейной и криволинейной в горизонтальной плоскости) использовали следующую кинематическую схему работы пресса РО-3М при формообразовании обтяжкой элемента-части полусферической оболочки. Пуансон поднимается вверх по оси Y на расстояние 820 мм, обтягивая лист. Затем зажимные губки пресса растягивают лист по оси X на 200 мм с каждой стороны. Условное время расчета – 0,2 с. Движение пуансона вверх: 0 – 0,1 с; растягивание губками краев листа: 0,1 – 0,2 с.

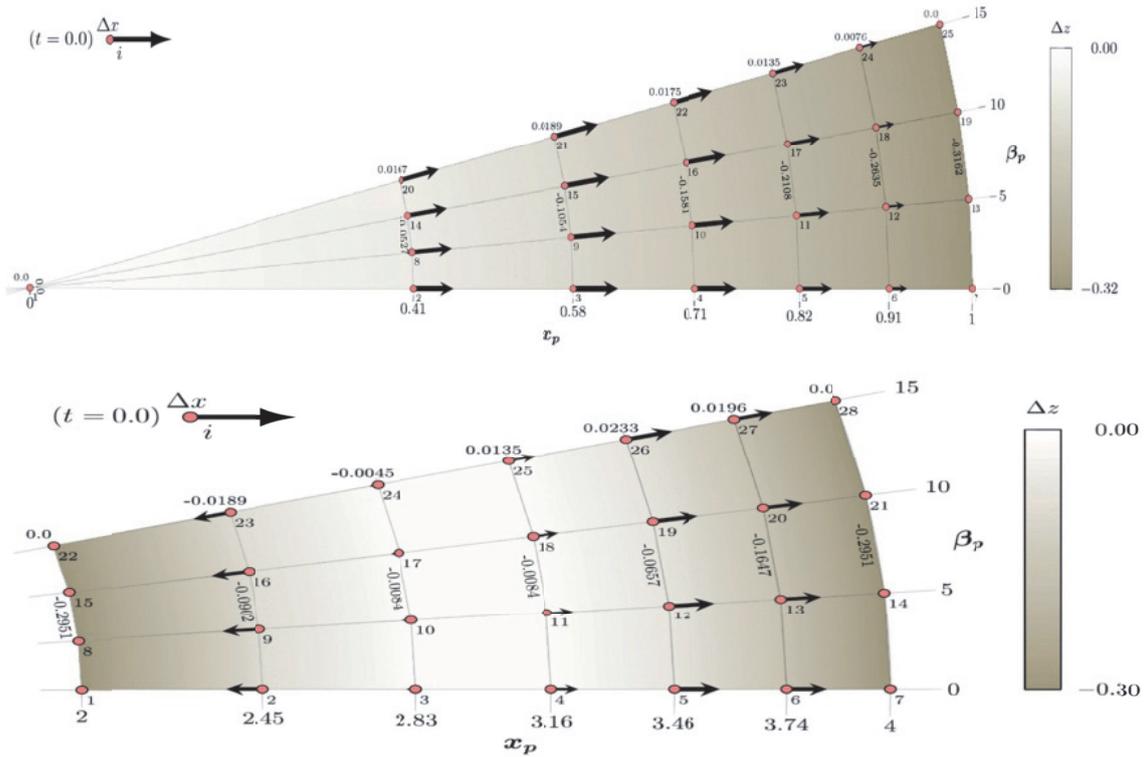


Рисунок 6 – Разница между текущими x и z координатами точки в момент времени t

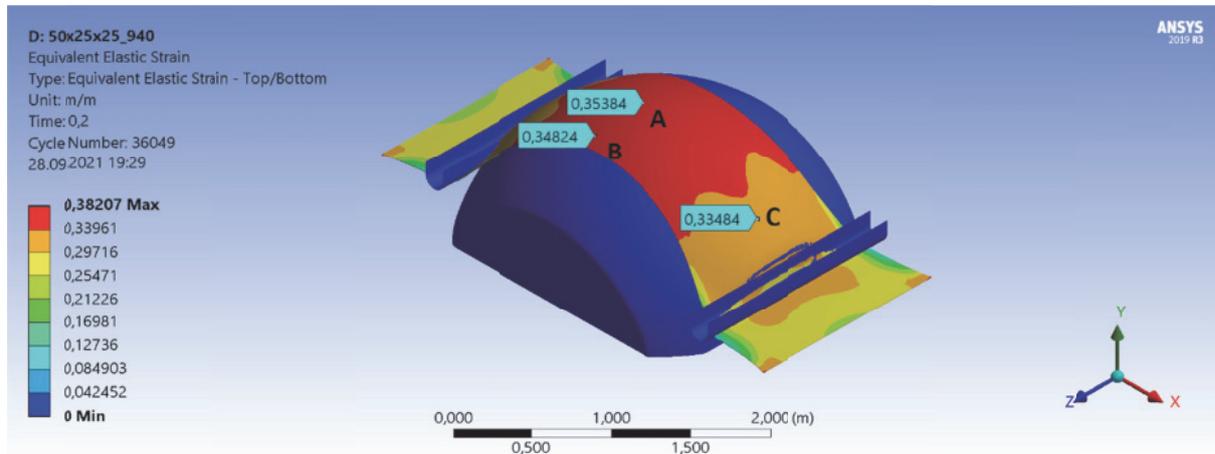


Рисунок 7 – Значения деформаций в трех характерных точках оболочки

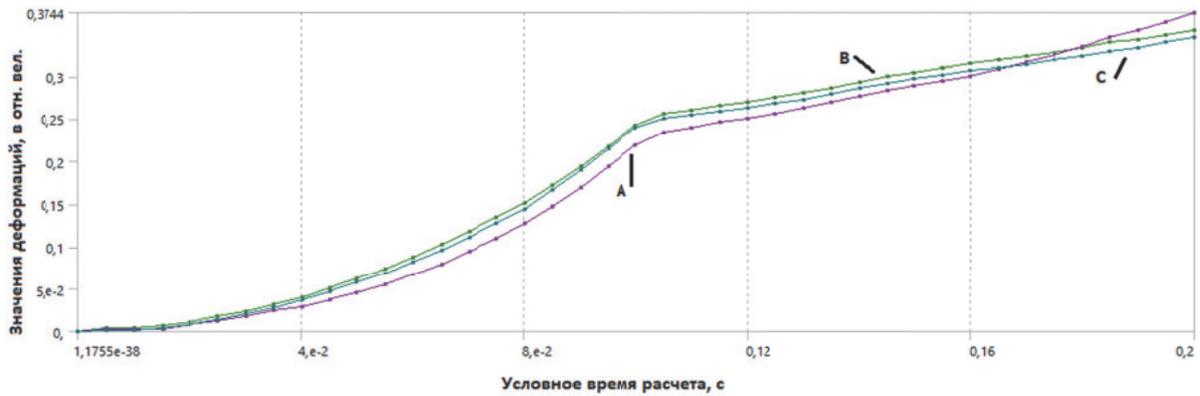


Рисунок 8 – График изменения деформаций

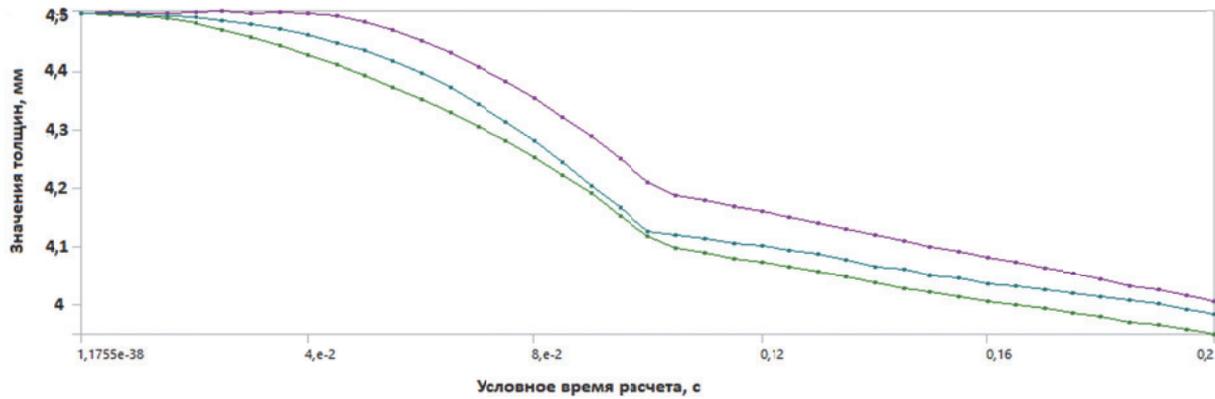


Рисунок 9 – График изменения толщины

РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЯЖКИ СЕГМЕНТА ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ ШТАНГАМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Кинематика процесса: пуансон поднимется вверх по оси Y на 1100 мм, затем осаживается вниз по оси Y на 400 мм, после чего снова поднимается вверх по оси Y на 500 мм. Также было принято решение обрезать заготовку с правого и левого краев и использовать переменное поперечное сечение штанг (рисунок 10). Решение по

обрезке листа было принято исходя из того, что из обтянутого листа будут вырезать полусферический сегмент, поэтому края заготовки можно убрать из расчета, что позволит получить более равномерные значения деформаций и толщин.

На этот раз замеры проводились в пяти точках, для полноты картины. В результате сочетания клюва-штанги и обрез заготовки уменьшил разность деформаций: значения в точке А, В и С – 25-26%, в точках D и E – 24% (рисунок 11).

На графике деформаций (рисунок 12) в отрезке времени 0–0,1 с происходит позицио-

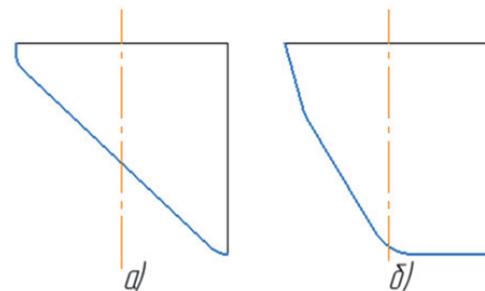
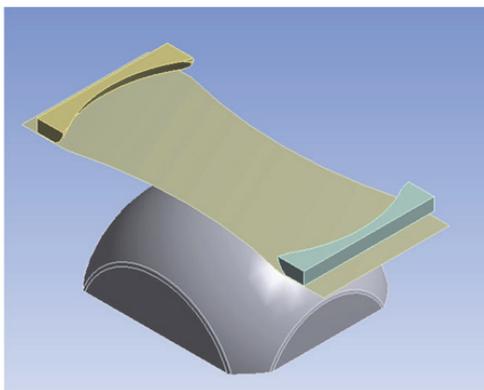


Рисунок 10 – Конечно-элементная модель

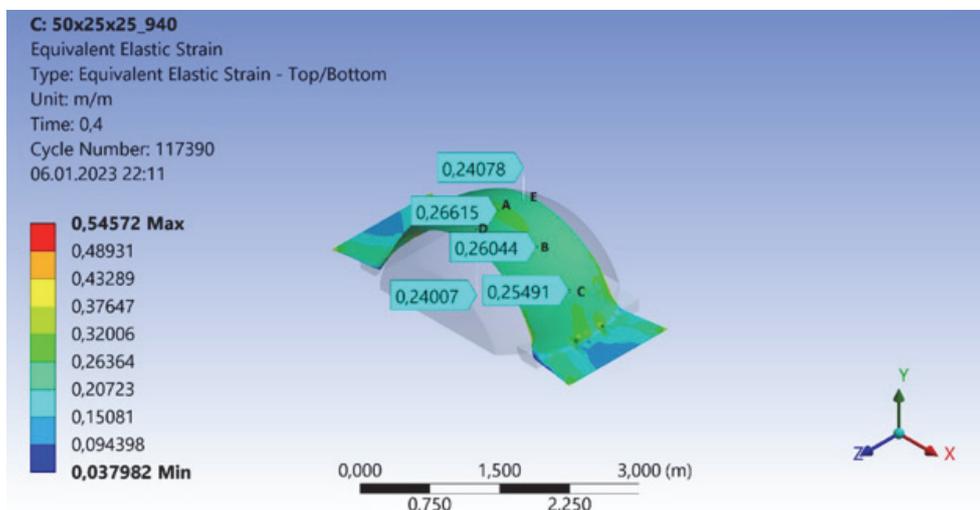


Рисунок 11 – Значения деформаций в трех точках

нирование штанг близко к пуансону и соприкосновение их с листовой заготовкой; 0,1–0,2 с – вытяжка пуансоном; 0,2–0,3 с – осаживание пуансона; 0,3–0,4 с – повторная вытяжка пуансоном на большее расстояние.

На рисунке 13 представлен график изменения толщин оболочки в пяти точках.

Таким образом, применяя прямолинейные штанги переменного сечения при формообразовании сферического сегмента полусферической оболочки в отличие от штанг постоянного сечения, был получен формообразующий эффект, обеспечивающий получение равномерной толщины при меньших значениях деформаций растяжения порядка 2,4–2,6 % при сравнении со значениями порядка 3,3–3,6 %. Формообразующий эффект расширяет технологические возможности получения сферического сегмента полусферической оболочки из листового материала свариваемого алюминиевого сплава АМг6М толщиной 4,5 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель формовочной деформации для полусферы была получена с применением предложенных принципов и методов. Идеальная геометрическая интерполяция, полученная для рассматриваемой геометрии, представляет собой формовочную деформацию в реальной детали. Таким образом, однородность по толщине достигается вдоль нее в конце процесса формообразования.

В продолжении работ по достижению большей равномерности деформации оболочки были проведены имитационные моделирования процесса обтяжки. Наилучших результатов удалось добиться при использовании обрезанной заготовки по бокам с использованием штанг переменного поперечного сечения. Решение по обрезке листа было принято исходя из того, что из обтянутого листа будут вырезать полусферический сегмент, поэтому края заготовки можно

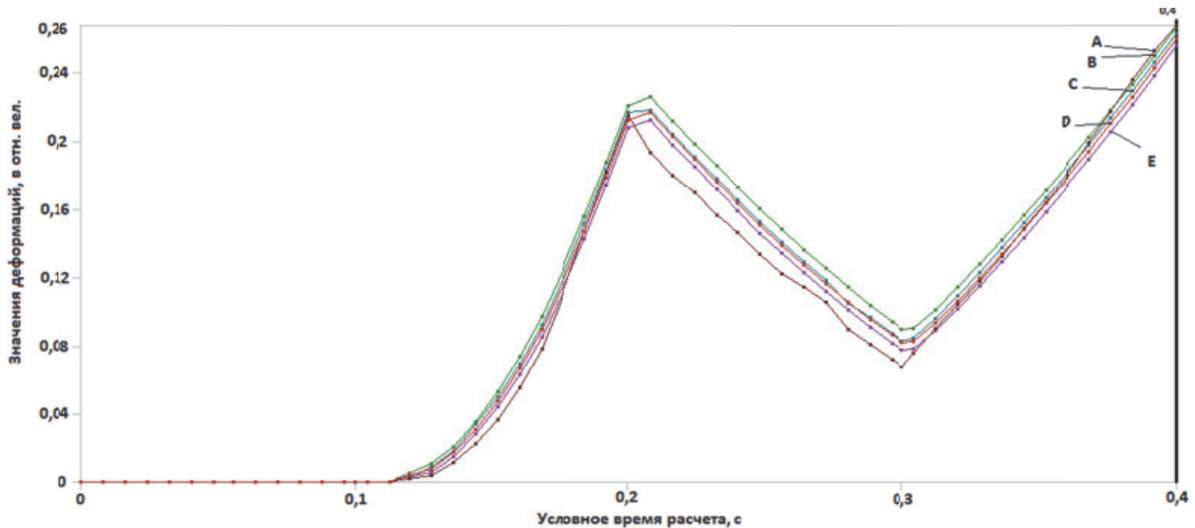


Рисунок 12 – График изменения деформаций

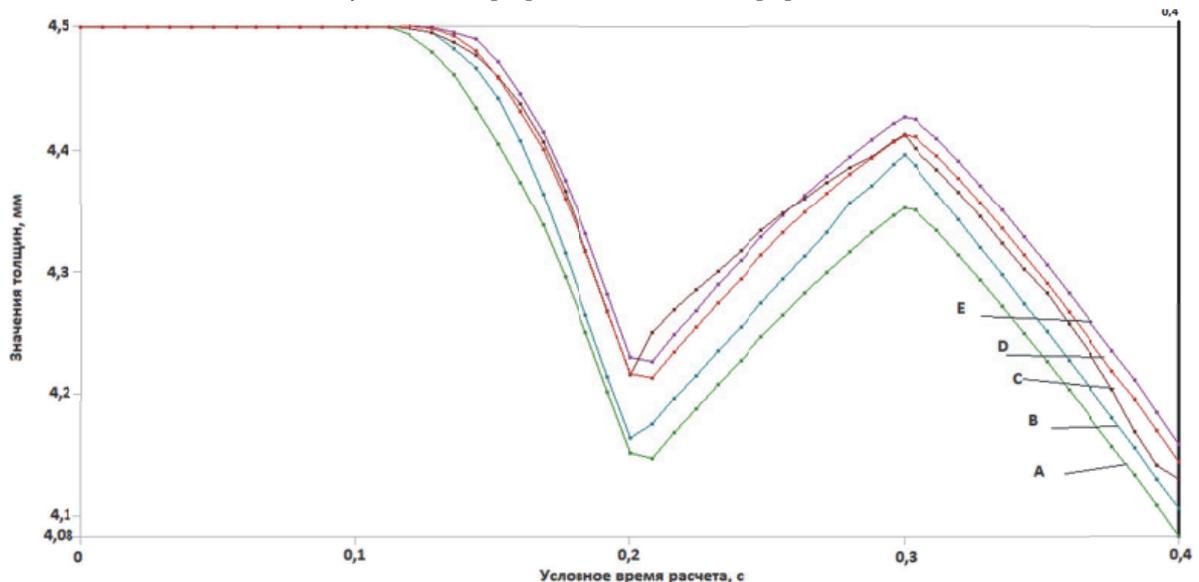


Рисунок 13 – График изменения толщин оболочки

убрать из расчета, что позволит получить более равномерные значения деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филин, А.П.* Элементы теории оболочек / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 384 с.
2. *Никиреев, В.М.* Практические методы расчета оболочек / В. М. Никиреев, В.Л. Шадурский. – М.: Стройиздат, 1966. – 269 с.
3. *Гаусс, К.Ф.* Труды по теории чисел / К.Ф. Гаусс. – Общая редакция академика И. М. Виноградова, комментарии члена-корр. АН СССР Б. Н. Делоне. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 978 с.
4. *Гаусс, К.Ф.* Общие исследования о кривых поверхностях / К.Ф. Гаусс // Основания геометрии (сб.). – М.: ГИТТЛ, 1956. – 71 с.
5. *Риман, Б.* Сочинения / Б. Риман. – М.: Гостехиздат, 1948. – 543 с.
6. *Бакушинский, А.* Элементы высшей математики и численных методов / А. Бакушинский, В. Власов. – М.: Просвещение, 2014. – 336 с.
7. *Михеев, В.А.* Преобразование схемы формообразования обтяжкой на принципах симметрии / В.А. Михеев, В.А. Тарасов, М.М. Баранова и др. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. № 1. – С. 53-62.
8. *Клайн, М.* Математика. Поиск истины: пер. с англ. Ю.А. Данилова, под ред. и с предисл. В. И. Аршинова, Ю. В. Сачкова / М. Клайн. – М.: Мир, 1988. – 295 с.
9. *Михеев, В.А.* Основы расчета процесса формообразования обтяжкой тонких оболочек двойной кривизны / В.А. Михеев, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19. № 1(3). – С. 555-562.

KINEMATICS ANALYSIS OF THE OF HEMISPHERICAL SHELLS FORMATION ON A SPECIALIZED STRETCH-TIGHT PRESS

© 2024 V.A. Mikheev, D.V. Gusev, M.M. Baranova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

The article analyzes the kinematics of the aluminum sheets shaping by the method of simulation modeling, which, initially flat, deform in space, taking on the surfaces of the segments of the hemisphere shell. Such surfaces are considered as geometric forms of independent space, that is, two-dimensional geometries corresponding to these spaces can be very successful in their construction, considering surfaces as a space in itself. Therefore, the transition from three-dimensional geometry to two-dimensional geometry turned out to be more convenient for determining the trajectories of each point on the initial flat surface to the corresponding final position in the required shell, which is reflected in space during the formation of hemispherical shells. Such a trajectory of a point and its final position, together with the trajectories and final positions of other points in the required shell, constitute a shaping deformation, which can ensure that a shell with a uniform thickness is obtained over all geodesic forming surfaces of the shell of a given geometric shape at the end of the shaping process. The article describes the results of shaping in the modeling of segments-part hemispheres made of aluminum sheets of AMg6 alloy with a thickness of 4,5 mm on a specialized stretch-tight press.

Keywords: skinning, shaping, stretch-tight press, numerical modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-67-76

EDN: CSUODC

REFERENCES

1. *Filin, A.P.* Elementy teorii obolochek / A.P. Filin. – L.: Strojizdat. Leningr. otd-nie, 1987. – 384 s.
2. *Nikireev, V.M.* Prakticheskie metody rascheta obolochek / V. M. Nikireev, V.L. SHadurskij. – М.: Strojizdat, 1966. – 269 s.
3. *Gauss, K.F.* Trudy po teorii chisel / K.F. Gauss. – Obshchaya redakciya akademika I. M. Vinogradova, kommentarii chlena-korr. AN SSSR B. N. Delone. – М.: Izd-vo AN SSSR, 1959. – 978 s.
4. *Gauss, K.F.* Obshchie issledovaniya o krivykh poverhnostyah / K.F. Gauss // Osnovaniya geometrii (sb.). – М.: GITTL, 1956. – 71 s.
5. *Riman, B.* Sochineniya / B. Riman. – М.: Gostekhizdat, 1948. – 543 s.
6. *Bakushinskij, A.* Elementy vysshej matematiki i chislennyh metodov / A. Bakushinskij, V. Vlasov. – М.: Prosveshchenie, 2014. – 336 s.
7. *Miheev, V.A.* Preobrazovanie skhemy formoobrazovaniya obtyazhkoj na principah simmetrii / V.A. Miheev, V.A. Tarasov, M.M. Baranova i dr. // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2024. – Т. 26. № 1. – S. 53-62.
8. *Klajn, M.* Matematika. Poisk istiny: per. s angl. YU.A. Danilova, pod red. i s predisl. V. I. Arshinova, YU. V. Sachkova / M. Klajn. – М.: Mir, 1988. – 295 s.
9. *Miheev, V.A.* Osnovy rascheta processa formoobrazovaniya obtyazhkoj tonkih obolochek dvojnnoj krivizny / V.A. Miheev, S.V. Surudin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2017. – Т. 19. № 1(3). – S. 555-562.

Vladimir Mikheev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming.

E-mail: vamicheev@ramler.ru

Dmitry Gusev, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: gushidding97@mail.ru

Marina Baranova, Graduate Student of the Department of Metal Forming. E-mail: marinaaaaad@mail.ru